

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**



**НАСТЕНКО ОЛЬГА ВІКТОРІВНА**

УДК 66.021.1:532.5

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ІНЕРЦІЙНО-ФІЛЬТРУЮЧОЇ  
СЕПАРАЦІЇ ГАЗОРІДИННИХ СУМІШЕЙ**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Суми – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Лященко Олександр Олександрович**,  
Сумський державний університет,  
доцент кафедри процесів та обладнання хімічних і  
нафтопереробних виробництв.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Шاپорев Валерій Павлович**  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут», м. Харків,  
завідувач кафедри «Хімічної техніки та промислової  
екології»

кандидат технічних наук, старший науковий  
співробітник  
**Вакал Сергій Васильович**  
ДП "Сумський державний науково-дослідний інститут  
мінеральних добрив та пігментів", м. Суми,  
директор

Захист відбудеться «28» жовтня 2016 року об 13:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.04 у Сумському державному університеті (40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, ауд. Ц 204).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету (40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2).

Автореферат розісланий «26» вересня 2016 року.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради К 55.051.04  
кандидат технічних наук, доцент



Л. Л. Гурець

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Процеси сепарації газодисперсних потоків є супутніми в більшості технологічних процесів хімічної технології та суміжних галузей промисловості. При інерційно-фільтруючій сепарації газорідинних сумішей пропонується одночасно з основним процесом інерційного осадження застосовувати механізми фільтрування для уникнення негативного впливу на основний процес сепарації вторинних процесів (руйнування структури плівки вловленої рідини, винесення бризок). За допомогою цього досягається зниження гідравлічного опору та підвищення ефективності сепарації, а у випадку додаткового охолодження також стає можливим не тільки ефективно очищати газові викиди, а й додатково уловлювати та утилізувати цінні цільові компоненти, що в газорідинному потоці можуть бути виділені навіть у вигляді конденсаційного туману. При цьому, процеси інерційно-фільтруючої сепарації (гідродинаміка газової фази, гідродинаміка рідинної фази, взаємодія газового та рідинного потоків) ускладнюються супутнім теплообміном. Тому задача моделювання та дослідження таких складних процесів та їх взаємного впливу з метою удосконалення інерційно-фільтруючого сепараційного обладнання, постає актуальною і відноситься до невирішених задач з процесів та обладнання хімічної технології.

У зв'язку з цим можна стверджувати, що тема дисертаційної роботи є актуальною, має важливе наукове та практичне значення, оскільки вирішує наукове завдання, спрямоване на моделювання процесів інерційно-фільтруючої сепарації газорідинних сумішей і удосконалення науково-обґрунтованих методів розрахунку основних технологічних параметрів та характеристик інерційно-фільтруючого сепараційного обладнання.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота відповідає тематичному плану науково-дослідних робіт кафедри процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв (ПОХНВ) Сумського державного університету в рамках держбюджетної тематики «Дослідження гідродинамічних та масотеплообмінних характеристик пристроїв з вихровим та високотурбулізованими одно- та двофазними потоками» (номер державної реєстрації 0110U002632), термін виконання – 2010–2014рр., а також держбюджетної тематики «Гідродинамічні показники двофазних потоків тепломасообмінного, грануляційного та сепараційного обладнання» (номер державної реєстрації №0115U002551), термін виконання – 2015-2019рр. Замовник – Міністерство освіти і науки України.

Наукові результати та практичні рекомендації дисертаційної роботи впроваджені при виконанні НДДКР за господарчими договорами: НДР з вдосконалення схеми технологічного процесу лінії цинкування ділянки гальванічних покриттів АТ «Сумський завод «Насосенергомаш» (договір №51.21-01.13.СП від 01 вересня 2013 р.), виконання НДР з вдосконалення виробництва лікарської продукції, спецій та натуральних інгредієнтів ТОВ «Сумифітофармація» (договір №51.18-02.15.СП від 18 лютого 2015р.), виконання ДКР з розробки підігрівача-деемульсатора типу «HEATER-

TREATER» установки підготовки нафти (договір №51.18-04.15.СП від 18 травня 2015 р.), виконання ДКР з проектування сепараційного, тепло- та масообмінного обладнання установки для виробництва аміачної води (договір №51.18-05.15.СП від 12 липня 2015 р.). Здобувач виступала в якості відповідального виконавця господарчих НДДКР.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є моделювання процесів інерційно-фільтруючої сепарації газорідних сумішей, удосконалення існуючих методів розрахунку гідродинамічних характеристик та геометричних показників інерційно-фільтруючих сепараторів, видача рекомендацій з інженерного проектування інерційно-фільтруючих сепараторів-конденсаторів для очищення газорідних сумішей.

Для досягнення поставленої мети послідовно вирішені наступні задачі досліджень:

- проведено аналіз відомих способів сепарації та техніки очистки газів, а також порівняння їх основних характеристик, визначено фізичні умови утворення та фазової рівноваги газоконденсатних систем, які впливають на інтенсивність та ефективність процесу інерційно-фільтруючої сепарації;
- розроблено фізичну модель руху газокраплинного потоку секціями інерційно-фільтруючого сепаратора, а також взаємодії газового потоку та плівки вловленої рідини для математичного моделювання та експериментальних досліджень процесів інерційно-фільтруючої сепарації;
- розроблено математичну модель, що описує процеси інерційно-фільтруючої сепарації, гідродинаміку руху газового та рідинного потоків криволінійними каналами, взаємодію газового потоку та плівки вловленої рідини, а також супутній теплообмін при протіканні процесу сепарації з конденсацією;
- експериментально досліджено гідродинаміку руху газорідного потоку секціями блочного сепаратора експериментальної установки, ефективність роботи вузлів за ступенями сепарації та сумарну ефективність блочного газосепаратора, визначено ефективність уловлення краплин рідини кожною гофрою інерційно-фільтруючого блоку, а також фракційну ефективність сепарації;
- розроблено і надано рекомендацій до інженерного проектування інерційно-фільтруючих сепараційного обладнання за допомогою систем моделювання методами обчислювальної гідродинаміки;
- проведено апробацію та впровадження отриманих наукових результатів.

**Об'єкт дослідження** – процеси інерційно-фільтруючої сепарації газорідних сумішей та інерційно-фільтруюче сепараційне обладнання.

**Предмет дослідження** – гідродинаміка потоків з супутнім теплообміном у процесах інерційно-фільтруючої сепарації.

**Методи дослідження.** У роботі використовувалися методи фізичного та математичного моделювання процесів інерційно-фільтруючої сепарації газорідних сумішей. При проведенні експериментальних досліджень застосували методи багатофакторного планування експерименту. Для

розв'язання диференціальних рівнянь використовували аналітичні та чисельні методи. При математичному моделюванні та узагальненні отриманих експериментальних даних застосовано диференціальні методи математичного аналізу та інтегрального обчислення, які виконували за допомогою комп'ютерної техніки та пакета прикладних програм, а саме: MathCAD, MS Office Excel.

**Наукова новизна одержаних результатів.** На основі виконаних теоретичних моделювань та експериментальних досліджень процесів інерційно-фільтруючої сепарації газорідинних сумішей в дисертаційній роботі отримані такі наукові результати:

- вперше отримано розв'язок крайової задачі взаємодії турбулентного газового потоку, що рухається вздовж криволінійного каналу та ламінарного потоку плівки вловленої рідини, яка стікає по поверхні стінок каналу, що дозволить провести теоретичний аналіз та оптимізаційні розрахунки елементів інерційно-фільтруючих сепараторів;
- вперше отримано основні залежності, що описують супутній теплообмін при інерційно-фільтруючій сепарації з конденсацією;
- за допомогою теоретичного аналізу математичної моделі руху газокраплинного потоку у криволінійному каналі отримано аналітичний розв'язок системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса і чисельний розв'язок стаціонарної задачі моделювання руху краплин рідини щодо складових локальних швидкостей руху суцільної фази та дисперсних частинок з визначенням потенційних зон інерційно-фільтруючої сепарації та зон вторинного унесення бризок;
- дістали подальшого розвитку фізична та математична моделі процесів інерційно-фільтруючої сепарації, розроблено умови реалізації нового способу сепарації конденсацією високодисперсної краплинної рідини з використанням нових конструкцій інерційно-фільтруючих сепараторів-конденсаторів.

**Практичне значення отриманих результатів.**

- отримані аналітичні та чисельні розв'язки стаціонарних задач, що описують взаємодію газового потоку, краплин, плівки вловленої рідини і процеси сепарації їх за механізмами інерційного вловлювання та фільтрування з супутнім теплообміном, представляють практичну цінність у інженерному моделюванні подібних процесів за допомогою САЕ-систем обчислювальної гідродинаміки;
- на підставі отриманих результатів запропоновано нові способи розділення газорідинних сумішей, а також вдосконалені конструкції інерційно-фільтруючих сепараторів, що захищені патентами України на корисні моделі;
- науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджено при виконанні держбюджетних та госпдоговірних НДДКР, у тому числі міждисциплінарних проектів, що підтверджено отриманими актами впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи, що складають її сутність, отримані особисто здобувачем. Серед них:

статистичний збір матеріалу, його обробка, аналіз процесів та роботи конструкцій приладів для розділення газодисперсних систем; проведення фізичного та математичного моделювання процесів, що проходять під час інерційно-фільтруючої сепарації; підбір, розробка та апробація методик проведених експериментальних досліджень; створення експериментальної установки для дослідження гідродинаміки та ефективності роботи інерційно-фільтруючих сепараторів. Вибір теми дисертаційної роботи, постановка завдання і формулювання висновків проводилися під керівництвом наукового керівника – к.т.н, доцента, докторанта О.О. Ляпоценка.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: Міжнародній науково-технічній конференції «Хімічна технологія: наука і виробництво» (м. Шостка, 2012р.); науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій «Сучасні технології в промисловому виробництві» (2013р.); IX Міжнародній конференції «Стратегія якості в промисловості та освіті» (м. Варна, Болгарія, 2013р.); Міжнародній конференції молодих вчених «ССТ-2013 Хімія та хімічні технології» (м. Львів, 2013р.); III Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2014р.); XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2014р.); IV-й Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані технології та енергозбереження» ІТЕ-2014 (м. Харків, 2014р.); Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ І ПРОЦЕСИ» (м. Курськ, Росія, 2014 р.); XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Герметичність, вібронадійність і екологічна безпека насосного і компресорного обладнання. ГЕРВІКОН-НАСОСИ-2014» (м. Суми, 2014р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво» (м. Шостка, 27–29 листопада 2014р.); 21й міжнародній науковій конференції «Технології XXI століття» (м. Суми, 8-10 вересня 2015 р.); XI Національній конференції багатофазних потоків (м. Гданськ, Польща, 7-9 жовтня 2015р.); I Всеукраїнській науково-технічній конференції (м. Дніпропетровськ, 3-5 листопада 2015р.); IV Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2016р.); Міжнародній науково-технічній конференції та виставці «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу» ІМ – 2016 (м. Івано-Франківськ, 16-20 травня 2016 р.).

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковані у 30 наукових працях, із них 10 статей – у наукових журналах, (у т.ч. 6 - у наукових фахових виданнях, затверджених МОН України, 4 статті – в міжнародних журналах, з них 1 стаття в виданні, що індексується базою Scopus), 16 публікацій тез доповідей у матеріалах і працях конференцій та 4 патентах України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел на 14 сторінках, що охоплює 125 найменувань, та додатків. Загальний обсяг дисертації 163 сторінки, із них 133 сторінки основного тексту, 6 таблиць, 40 ілюстрацій, і додатки на 15 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, показано зв'язок із науковими програмами, сформульовано мету і завдання досліджень, їх практичне значення та наукову новизну, наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи, публікації та подано загальну характеристику роботи.

**У першому розділі** на основі огляду літературних джерел і проведеного патентного пошуку приведено класифікацію газодисперсних систем і обладнання для їх розділення.

Проаналізовані сучасний стан та шляхи розвитку технологій та техніки сепарації газорідинних сумішей, а також особливості конструкцій та роботи інерційно-фільтруючого обладнання. Наведено основні розрахункові залежності для їх конструювання.

Також розглянуто і проаналізовано фізичні умови та механізми утворення і формування газорідинних потоків. Проаналізовано та наведено основні підходи до розрахунку фазової рівноваги газорідинних сумішей. Наведено вихідні рівняння та залежності для моделювання гідродинаміки та супутнього теплообміну при інерційно-фільтруючій сепарації.

На підставі розглянутих способів сепарації, методик розрахунку технологічних та конструктивних показників, а також основних недоліків роботи обладнання для розділення газорідинних сумішей, визначено основні напрямки проведення досліджень.

**У другому розділі** наведено фізичну модель процесів, що відбуваються при русі газорідинного потоку секціями інерційно-фільтруючого сепаратора, а саме рух газового та рідинного потоків криволінійними каналами та їх взаємодія, проникнення крапель рідини в фільтруючі секції. Рух газового потоку з високодисперсною краплинною рідиною секціями інерційно-фільтруючого сепаратора розділимо на декілька стадій: рух газокраплинного потоку інерційною секцією криволінійного сепараційного каналу, конденсація пароподібної вологи з газового потоку, проникнення газокраплинного потоку у фільтруючі секції, коалесценція вловлених часток на волокнах у шарі фільтру, утворення та відведення плівки вловленої рідини до дренажних каналів.

Також наведені методика та основні методи експериментальних досліджень процесів сепарації, які було проведено в лабораторних умовах кафедри. Експериментальні дослідження виконувались на стенді, що зображений на рис. 1 та рис. 2. Визначення похибки вимірювань і узагальнення результатів базується на загальноприйнятих методиках і рекомендаціях із проведення інженерного експерименту та обробці отриманих даних.

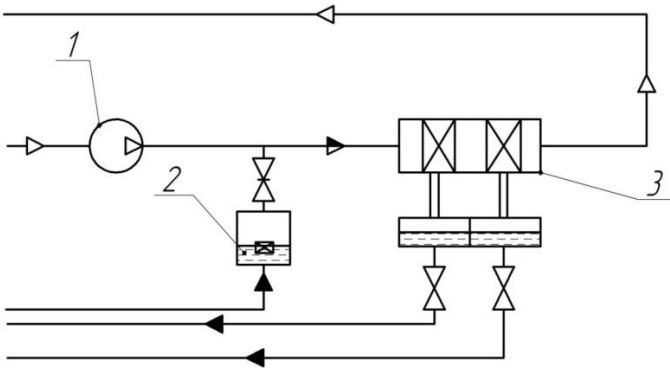


Рисунок 1 - Схема експериментальної установки: 1 – газодувка, 2 – парогенератор, 3 – модель блочного сепаратора

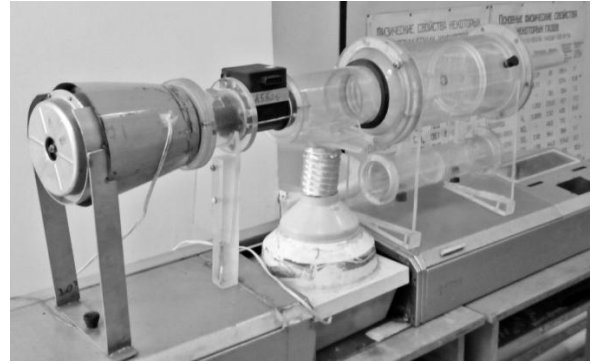


Рисунок 2 – Фото експериментальної установки для дослідження гідродинаміки і ефективності сепарації

У третьому розділі представлено результати теоретичних досліджень процесів інерційно-фільтруючої сепарації, наведено розроблену математичну модель гідродинаміки руху з супутнім теплообміном газорідинної суміші криволінійними каналами інерційно-фільтруючого сепаратора.

Рух в'язкого газового потоку в криволінійному каналі інерційно-фільтруючого сепаратора зручно описувати системою рівнянь Нав'є–Стокса в циліндричній системі координат, а для того щоб замкнути дану систему рівнянь, її доповнюють рівнянням нерозривності потоку. Всі наступні математичні вирази, а також система нелінійних диференціальних рівнянь 2-го порядку мають аналітичний розв'язок лише в дуже рідкісних випадках з простою геометрією каналів. Тому було прийнято ряд таких спрощень і припущень: розглядається плоский потік, тобто рівняння Нав'є–Стокса складаються для двовимірного простору в полярній системі координат, при цьому різниця тисків по ширині каналу невелика за невеликої ширини каналу, а також, товщина фільтруючого елемента не значна, в порівнянні з шириною каналу, тому в місці його встановлення не враховується стиснення потоку.

Отже, вирішуємо систему рівнянь відносно радіальної швидкості  $V_r$ , після чого підставляємо отриманий розв'язок в рівняння нерозривності потоку та інтегруємо. Після проведення всіх необхідних перетворень рішення системи рівнянь Нав'є–Стокса для  $V_r$  та  $V_\phi$  приймають вигляд:

$$\begin{cases} V_\phi = \beta q - \sum A_i \cdot f_i \cdot \psi_i \\ V_r = \sum A'_i \cdot f_i \end{cases} \quad (1)$$

При проведенні спрощень було позначено:  $\psi_i(r) = 1 + \frac{2r_i}{(r-r_1)(r-r_2)} \left( r - \frac{r_1+r_2}{2} \right)$ ,  $f_i(r) = (r-r_1)^i (r-r_2)^i$ ,  $A_i$  та  $A'_i$  - функції, які далі визначені.

Далі для знаходження невідомих функцій  $A_i$  та  $A'_i$  осереднюємо рівняння Нав'є–Стокса по радіусу, а також множимо на  $r$ . Після проведення цих операцій, скорочень та спрощень першого рівняння Нав'є–Стокса, отримуємо:

$$A''' - \frac{\rho q \xi_1}{\mu \gamma_1} A'' - 3A' + \frac{2\rho q \xi_2}{\mu \gamma_1} A = -\frac{\chi_1 \rho q^2}{\mu \gamma_1} \quad (2)$$



Аналогічно для другого рівняння Нав'є-Стокса з системи (1), отримуємо:

$$\frac{dp}{d\varphi} = -\frac{\rho q \xi_1 A'}{\delta} - \frac{\mu(\chi_2 + \chi_3)q}{\delta} \quad (3)$$

При проведенні спрощень було позначено  $\xi_1 = \int \beta f_i dr$ ,  $\xi_2 = \int \beta f_i \psi_i dr$ ,

$$\gamma_1 = \int \frac{f_i}{2} dr, \quad \chi_1 = \int r \beta'' dr, \quad \chi_3 = \int \frac{\beta}{r} dr, \quad \delta = \int_{r_1}^{r_2} dr = r_2 - r_1 - \text{радіальний зазор.}$$

Для вирішення рівняння (2) вводимо такі умови:

$$V_r|_{\varphi=0} = 0 \Rightarrow A'(0) = 0; \quad \left. \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0 \Rightarrow A''(0) = 0; \quad V_\varphi|_{\varphi=0} = \beta \cdot q \Rightarrow A(0) = 0.$$

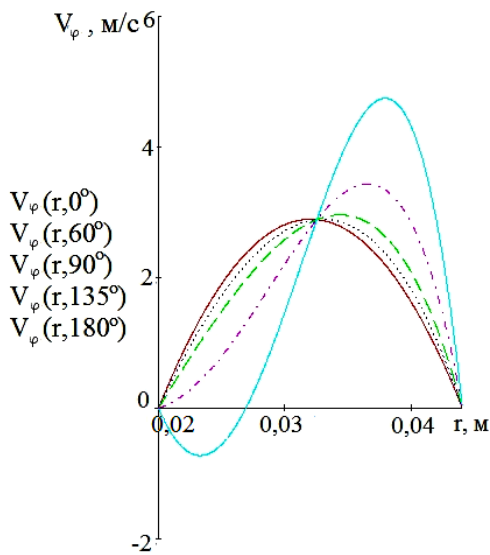


Рисунок 3 - Розподіл тангенціальної швидкості газового потоку по ширині каналу в різних перетинах

Інтегруванням рівняння (3) в межах від  $\varphi = 0^\circ$  до  $\varphi = \pi$  отримуємо рівняння для перепаду тисків по довжині каналу:

$$p(\varphi) = p_0 - \frac{\rho q}{\delta} \left( \xi_1 \frac{d}{d\varphi} A(\varphi) + \varepsilon(\kappa_2 + \kappa_3) \right) - \varepsilon \left( (\gamma_2 - \gamma_1) A(\varphi) + 3\gamma_1 \frac{d^2}{d\varphi^2} A(\varphi) \right) \quad (5)$$

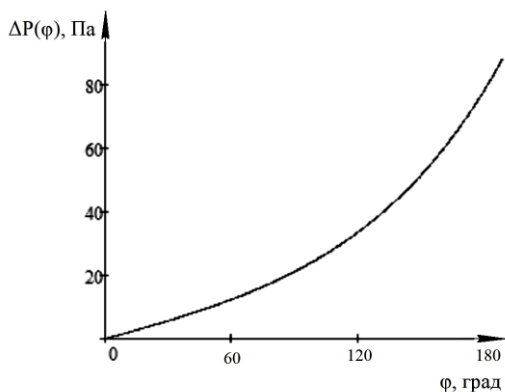


Рисунок 4 – Графік зміни тиску вздовж гофри

Отже, рішення рівняння (2) має вигляд:

$$A(\varphi) = C(\text{ch}(\lambda_1 \varphi) - 1) \quad (4)$$

Чисельним рішенням отриманих рівнянь, базуючись на вихідних даних з експериментальної установки, було отримано розподіл тангенціальної швидкості газового потоку по ширині каналу (рис. 3).

Функція  $A(\varphi)$  визначається з точністю до множника  $C$ , який залежить від профілю швидкості на вході та по довжині каналу (інтенсивності зворотних токів), і потребує уточнення експериментальним шляхом.

$$\Delta p(\varphi) = \frac{\lambda_1 \xi_1 \sigma \rho q}{\delta k^2 \theta} \text{sh}(\lambda_1 \varphi) \quad (6)$$

Де при проведенні спрощень було позначено

$$k = \sqrt{\frac{2\xi_2}{\xi_1}}, \quad \sigma = \frac{\kappa_1 q^2}{\varepsilon \gamma_1}.$$

Тобто, отримані рішення дають можливість спрогнозувати перепад тисків після кожної гофри (рис.4).

При математичному моделюванні гідродинаміки руху краплин рідини в газовому потоці були використані ті ж спрощення та припущення, що і для моделювання руху газового потоку, а також прийнято, що газорідинна суміш є монодисперсною, краплі мають кулясту форму та їх густина є постійною. Задачу вирішуємо стаціонарну.

Вихідною системою рівнянь, що описують рух крапель рідини в газовому потоці є:

$$\begin{cases} \frac{dw_r}{dt} = \frac{w_\varphi^2}{r} + \psi \frac{\pi\mu_\Gamma d_K}{8m} (v_r - w_r); \\ \frac{dw_\varphi}{dt} = -\frac{w_r w_\varphi}{r} + \psi \frac{\pi\mu_\Gamma d_K}{8m} (v_\varphi - w_\varphi). \end{cases} \quad (7)$$

З другого рівняння даної системи, виключаючи складові по часу, виражаємо тангенціальну складову швидкості крапель і підставляємо отриманий вираз в перше рівняння системи:

$$\frac{(\alpha V_\varphi)^2}{\left(\alpha + \frac{W_r}{r}\right)^2} + \alpha(V_r - W_r) = 0 \quad (8)$$

При розв'язанні даного рівняння отримуємо два комплексно-сполучених (уявних) рішень і одне дійсне, яке має вигляд:

$$W_r^3 + (2\alpha r - V_r) \cdot W_r^2 + \alpha r(\alpha r - 2V_r) \cdot W_r - \alpha r(V_\varphi^2 + \alpha r V_r) = 0 \quad (9)$$

Чисельним рішенням отриманих рівнянь, базуючись на вихідних даних з експериментальної установки, було отримано розподіл радіальної та тангенціальної швидкостей газового потоку по ширині каналу (рис. 5 та 6).

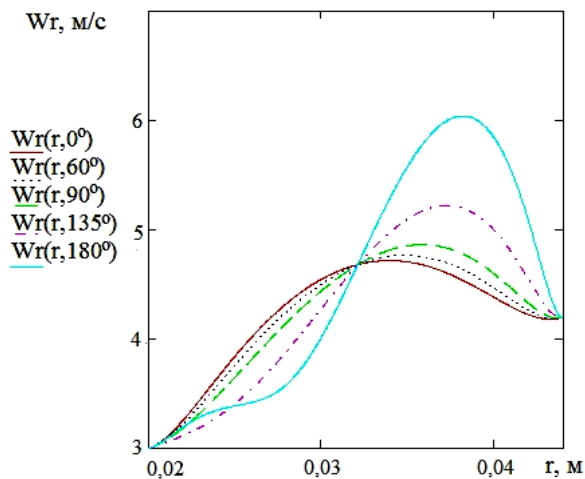


Рисунок 5 - Розподіл радіальної швидкості крапель рідини по ширині каналу в різних перетинах

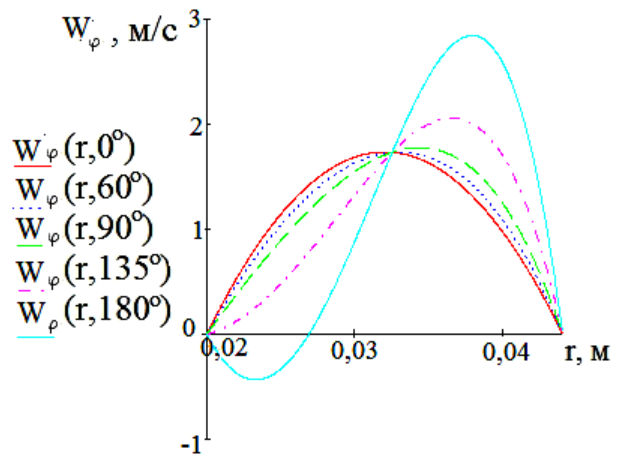


Рисунок 6 - Розподіл тангенціальної швидкості крапель рідини по ширині каналу в різних перетинах

Після знаходження складових швидкості газового та рідинного потоків у будь-якій точці каналу було розраховано та побудовано траєкторії руху потоків, які знаходяться під час чисельного циклічного вирішення ряду Тейлора для  $\Gamma(\varphi)$ . А також була вирішена задача розрахунку ефективності роботи кожної гофри та визначено розподіл вловлених часток рідини по зовнішній стінці криволінійного каналу (рис. 7), що дозволяє визначити оптимальне місце розташування та геометричні розміри фільтруючих елементів.

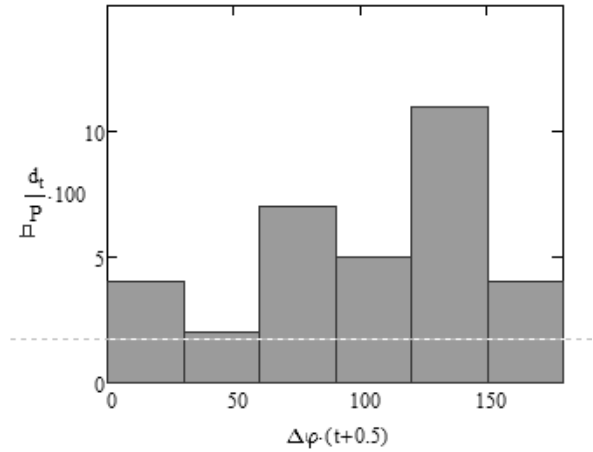


Рисунок 7 - Розподіл вловлених часток на кожній ділянці гофри

Як видно з рис.8, краплі рідини уловлюються по всій довжині криволінійного каналу, але найбільша ймовірність зриву крапель рідини з поверхні стікаючої плівки є на вихідних прямолінійних ділянках гофр. Тому біла вирішена задача моделювання взаємодії газового потоку та плівки вловленої рідини на прямолінійній вихідній ділянці каналу.

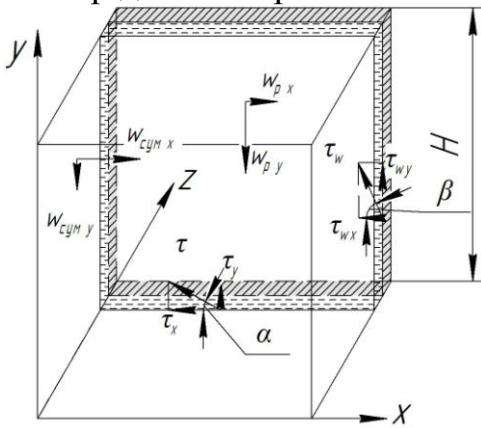


Рисунок 8 – Схема взаємодії газорідинного потоку і плівки рідини

При протіканні газового потоку біля стікаючої по вертикальній стінці плівки рідини, під дією сил міжфазного тертя газового потоку по поверхні плівки відбувається заволокання рідини і вона стікає по поверхні каналу не вертикально вниз, а під деяким кутом  $\beta$ . Стікаюча плівка рідини, в свою чергу, впливає на газовий потік таким чином, що він рухається під деяким кутом  $\alpha$  до осі X (рис.8)

$$\cos \alpha = \frac{2 \cdot \tau_w \cdot \cos \beta}{(\delta - \delta_p) \left[ \frac{2\tau}{\delta_p} - \frac{2\tau}{\delta - \delta_p} \right]} \quad (10)$$

$$\sin \beta = \frac{2g \cdot \rho_p \cdot \left( \frac{\delta}{2} - \frac{\delta_p}{2} \right) - \rho_{сум} \cdot g \cdot \delta_p}{2(-\tau_w)} \quad (11)$$

При протіканні процесів інерційно-фільтруючого сепарації зі зміною термодинамічних параметрів газорідинної системи, тобто коли газодисперсна суміш рухається біля більш холодної стінки, в потоці газу відбувається два самостійних процеси: конденсація пари та теплообмін.

Однією з основною задач при моделюванні є визначення кількості рідкої фази, що конденсується:

$$G_{y.n} = \frac{M}{RT} \left[ \left( \frac{T - T_2}{T_1 - T_2} \right)^\delta (p_1 - p_2) + p_2 - p_H \right] \quad (12)$$

При протіканні процесу конденсації на поверхнях стінок сепараційного каналу, пересичення значно знижується за рахунок теплоти конденсації. При цьому температура поверхонь стінок підвищується та стає вищою за температуру газової суміші. За рахунок цього відбувається процес відводу тепла від поверхні стінки каналу, що забезпечує можливість подальшої конденсації пари на ній. Рівняння теплопереносу та руху плівки при плівковій конденсації:

$$a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) = V_\varphi \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \quad (13)$$

При цьому, граничні умови взаємодії фаз на границі плівки:  $r = r_2$ ,  $T = T_{ст} = \text{const}$ ;  $r = r_2$ ,  $\lambda \partial T / \partial r = \alpha(T_{ст} - T_{гр})$ ;  $r = r_{гр}$ ,  $T = T_{гр}$  ( $r_{гр} = r_2 - \delta$ ).

Після вирішення наведеного рівняння поле температур  $T_{гр}(r, \varphi)$  набуває вигляду:

$$T_{гр}(r, \varphi) = T_{ст} + \frac{\Delta T_0}{\lambda_1 - \lambda_2} (\lambda_1 e^{\lambda_2 \varphi} - \lambda_2 e^{\lambda_1 \varphi}) \quad (14)$$

У четвертому розділі наведено аналіз основних режимних параметрів роботи інерційно-фільтруючих сепараторів, а також результати експериментальних досліджень гідродинаміки та ефективності розділення газодисперсних сумішей.

Дослідження гідродинаміки і ефективності процесу сепарації проведено на моделі блочного газосепаратора у схемі експериментального стенду. В основу фізичного моделювання покладено методи теорії подібності (рис. 9,10).

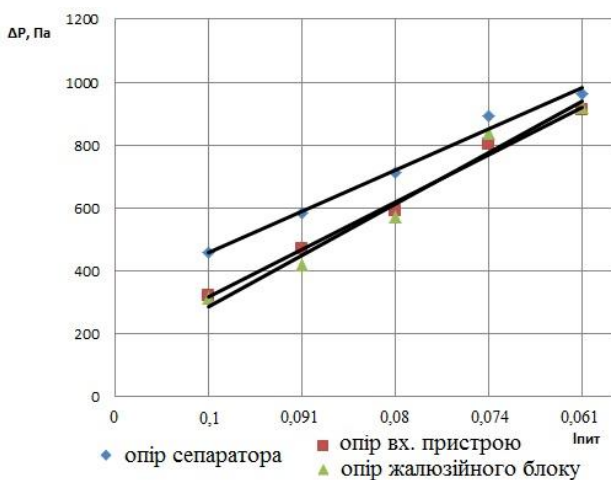


Рисунок 9 – Залежність гідравлічного опору  $\Delta P$  сепаратора та його внутрішніх пристроїв від  $I_{пит}$

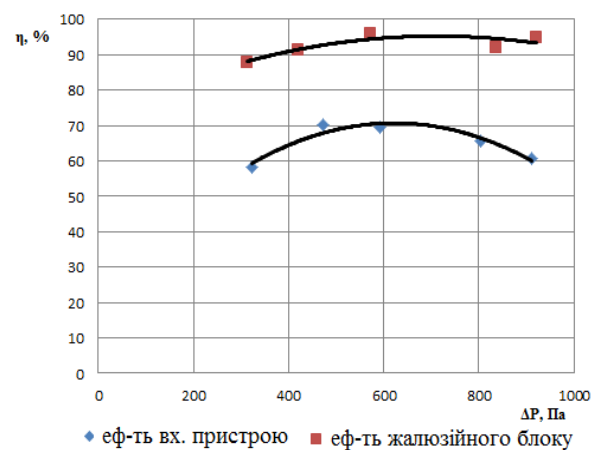


Рисунок 10 – Залежність ефективності  $\eta$  внутрішніх пристроїв сепаратора від їх гідравлічного опору  $\Delta P$

Також визначено необхідну кількість гофр жалюзійного блоку для ефективного розділення газодисперсних сумішей.

Таблиця 1 – Результати замірів зібраної кількості рідини ( $l_r$ ) та розрахунок ефективності сепарації кожної гофри при навантаженні по газу  $V = 0,033 \text{ м}^3/\text{с}$ .

$l \times 10^{-6}, \text{ м}^3$	$l_{r1} \times 10^{-6}, \text{ м}^3$	$\eta_{r1}, \%$	$l_{r2} \times 10^{-6}, \text{ м}^3$	$\eta_{r2}, \%$	$l_{r3} \times 10^{-6}, \text{ м}^3$	$\eta_{r3}, \%$	$l_{r4} \times 10^{-6}, \text{ м}^3$	$\eta_{r4}, \%$
5	1,21	36,14	2,97	70,61	0,74	90,24	0,077	96,25
8	2,42	38,41	4,89	80,73	0,6	86,96	0,084	93,33
10	3,12	39,17	5,94	80,74	0,85	90,43	0,086	95,56
12	4,19	38,12	6,9	84,34	0,81	89,01	0,097	97
15	5,99	39,5	8,01	85,73	0,9	90	0,096	96

Отже, після аналізу результатів експериментальних замірів кількості рідини, яку збирали після проходження газорідинною сумішшю кожної гофри жалюзійних пластин, експериментально підтверджено, що для ефективної роботи сепараторів інерційно-фільтруючого типу необхідно, щоб газодисперсний потік послідовно пройшов 4 гофри криволінійних каналів.

Отже, існують оптимальні області значень режимних параметрів процесу, при яких можна досягти максимальної ефективності сепарації газоконденсатної системи. З цього випливає, що для оптимізації процесів інерційно-фільтруючої сепарації, необхідно вміти комплексно контролювати та регулювати параметри, які безпосередньо впливають на ефективність.

У п'ятому розділі проведено узагальнення результатів досліджень процесів інерційно-фільтруючої сепарації. На основі аналізу отриманих теоретичних та експериментальних досліджень, їх зіставлення та поєднання, розроблено та видано рекомендації до інженерного проектування інерційно-фільтруючого сепараційного обладнання за допомогою систем моделювання методами обчислювальної гідродинаміки (CFD).

Порівняння результатів розрахунків та експериментальних замірів ефективності уловлення рідини наведено на рис.11, 12.

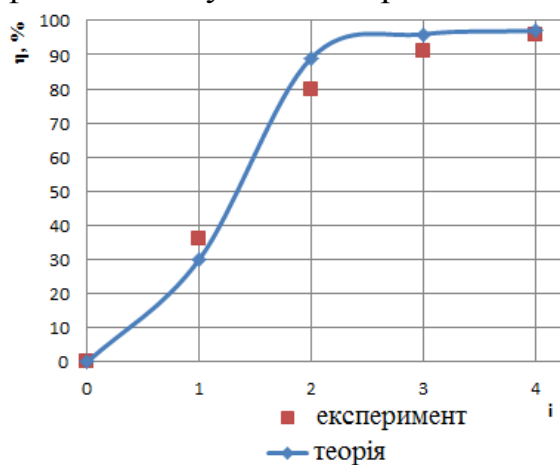


Рисунок 11 – Ефективність уловлення крапель рідини кожною гофрою сепаратора

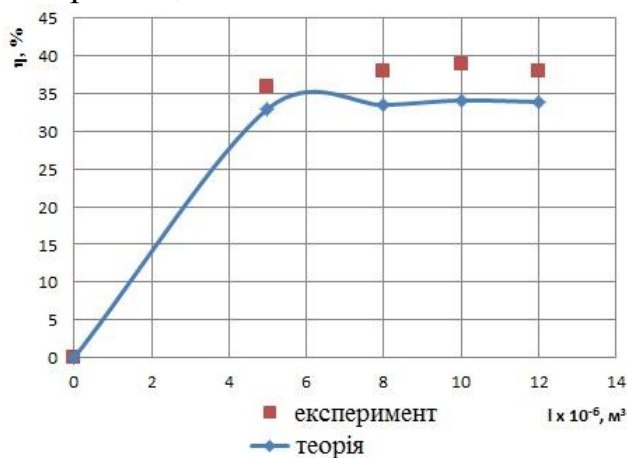


Рисунок 12 – Ефективність уловлення першою гофрою при різних кількостях рідини

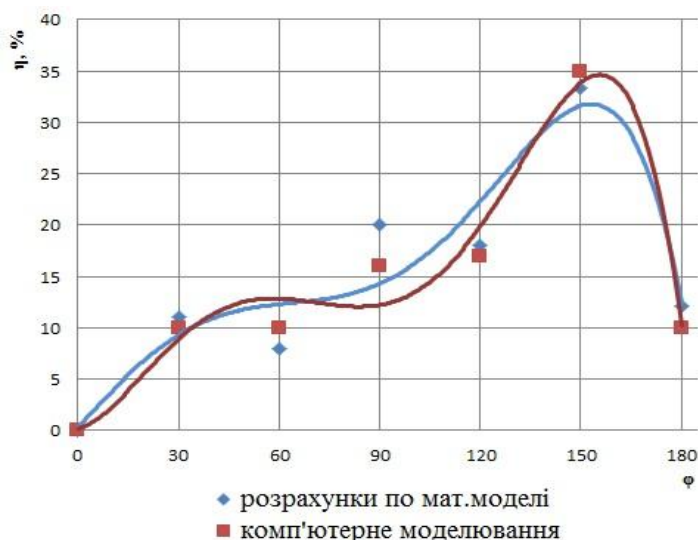


Рисунок 13 – Порівняння розподілу (концентрації) вловлених краплин рідини на зовнішній стінці каналу (на прикладі першої гофри)

Виходячи з отриманих розрахункових ліній току газорідинної суміші розраховано розподіл (концентрацію) вловлених часток рідини по зовнішній стінці каналу (на прикладі першої гофри). Отримані результати теоретичних досліджень добре корелюються та підтверджуються раніше проведеними комп'ютерними моделюваннями руху газокраплинного потоку криволінійним каналом (рис.13).

Під час виконання дисертаційної роботи отримані результати неоднократно використовувались в промислових та навчальних практиках, що засвідчено відповідними актами впровадження.

У додатках наведено акти впровадження наукових результатів дисертаційної роботи, лістинг програми для розрахунку гідродинаміки руху газового та рідинного потоків, а також розв'язання задачі конвективного теплообміну в плівці вловленої рідини.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз фізичних умов утворення та фазової рівноваги газоконденсатних систем, а також основних процесів їх розділення, дозволив обґрунтувати можливість інтенсифікації та підвищення ефективності сепарації газокраплинних потоків шляхом поєднання процесів гравітаційно-інерційної сепарації, фільтрування та охолодження.

2. Розроблено фізичну модель процесів сепарації газоконденсатних систем у робочих зонах інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв з урахуванням вторинних процесів, що супроводжують основний процес розділення, яка пояснює гідродинамічні процеси інерційної сепарації газокраплинного потоку, формування та стікання плівки вловленої рідини, а також механізми проникнення газокраплинного потоку у фільтруючі секції.

3. Математичним моделюванням процесів інерційно-фільтруючої сепарації отримано основні розрахункові залежності, що визначають гідродинаміку руху газового та рідинного потоків криволінійними каналами, взаємодію газового потоку та плівки вловленої рідини, а також вплив супутнього теплообміну при протіканні процесу сепарації з конденсацією, які використано при оптимізаційному геометричному профілюванні криволінійних каналів і фільтрувальних елементів.



4. Експериментально визначено гідравлічні і сепараційні характеристики окремих модельних інерційно-фільтруючих сепараційних секцій та блочних дослідно-промислових зразків інерційно-фільтруючих сепараторів, співставлено результати експериментальних досліджень та математичних моделювань. Визначено та проаналізовано вплив гідродинамічних та теплообмінних процесів на ефективність інерційно-фільтруючої сепарації газоконденсатних систем.

5. Розроблено і надано рекомендації до інженерного моделювання подібних процесів за допомогою САЕ-систем обчислювальної гідродинаміки (CFD) та проектування інерційно-фільтруючих сепараційного обладнання.

6. Запропоновано нові корисні моделі на способи сепарації та конструкції сепараційних і тепломасообмінних контактних пристроїв, захищені патентами України, які дозволяють значно інтенсифікувати та підвищити ступінь розділення багатокомпонентних газорідинних потоків.

7. Проведено впровадження отриманих наукових результатів та практичних рекомендацій при виконанні господарсько-договірних (3 акти впровадження) та міжфакультетських/міжкафедральних проектів (1 акт впровадження).

## ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$\beta$  – функція розподілу окружної швидкості;  $q$  – приведена витрата газу;  $\rho$  – густина газу,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_p$  – густина рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_{\text{сум}}$  – густина суміші,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості газу,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\tau_w$  – тертя на стінці каналу;  $\tau$  – міжфазне тертя;  $g$  – прискорення вільно падіння,  $\text{м/с}^2$ ;  $M$  – середня молекулярна маса газової суміші;  $T$  – температура газової суміші в кінці процесу,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_1$  – температура газової суміші на початку процесу,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_2$  – температура поверхні конденсації,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $p_1$  – тиск пари в газовій суміші на початку процесу,  $\text{Па}$ ;  $p_2$  – тиск пари біля поверхні конденсації,  $\text{Па}$ ;  $p_H$  – тиск насиченої пари,  $\text{Па}$ .

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Настенко О.В. Физическая модель формирования высокодисперсных систем в турбулентном потоке газа / Ляпощенко О.О., Логвин А.В., Аль Раммахи М.М., Настенко О.В. // Сборник научных трудов SWorld. «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2013». – Выпуск 1. Том 7. – 2013 – С.70-75. *Особистий внесок: проведено аналіз основних механізмів формування краплинної рідини в турбулентних газових потоках.*

2. Настенко О.В. Моделирование процессов сепарации та прогнозування ефективності роботи газосепараторів промислових установок газових та газоконденсатних родовищ / Ляпощенко О.О., Маренок В.М., Логвин А.В., Настенко О.В., Синельник Р.А. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2013. — №2(32). — С.13-17. *Особистий внесок: проведено*

*аналіз та узагальнення отриманих результатів комп'ютерних та математичних моделювань.*

3. Настенко О.В. Фазова рівновага газорідинних систем при інерційно-фільтруючій сепарації / Ляпощенко О.О., Настенко О.В. // Збірник наукових праць: «Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій». — 2013. — Вип.43. — Т.1. — С.90-93. *Особистий внесок: визначено основні параметри, що впливають на ефективність процесу розділення газових потоків з краплинною рідиною.*

4. Настенко О.В. Physical model of high-disperse gas-condensate systems formation in turbulent gas flow / Ляпощенко О.О., Логвин А.В., Аль Раммахи М.М., Настенко О.В. // E-Journal - Modern scientific research and their practical application. Vol.J21310, 2013. *Особистий внесок: проведено аналіз основних механізмів сепарації газорідинних сумішей.*

5. Настенко О.В. Методика та стратегія оптимізаційних досліджень при динамічному моделюванні процесів інерційно-фільтруючої сепарації у високоефективному енергозберігаючому газосепараційному обладнанні з застосуванням інтегрованих SCADA програмно-апаратних комплексів / Склабінський В.І., Ляпощенко О.О., Настенко О.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. — 2014. — №4. — С.89-95. *Особистий внесок: розроблено методику оптимізаційних досліджень інерційно-фільтруючого сепаратора.*

6. Настенко О.В. Modeling and Design of Inertial – Filtering Gas Separators-Condensers for Compressor Units of Oil and Gas Industry / Склабінський В.І., Ляпощенко О.О., Аль Раммахи М.М., Настенко О.В. // Applied Mechanics and Materials — 2014. — Vol.630.— P.117-123. *Особистий внесок: проаналізовано результати математичного моделювання процесів сепарації в інерційно-фільтруючих сепараторах-конденсаторах.*

7. Настенко О.В. Analysis of the conditions of phase equilibrium and influence of the united heat and mass transfer on the effectiveness of separation in the inertial-filtering separator / Ляпощенко О.О., Настенко О.В. // Chemistry & chemical technology – Vol. 9, No. 1, 2015 – P. 125-130. *Особистий внесок: проаналізовано основні термодинамічні параметри, які мають найбільший вплив на ефективність процесів поділу газорідинних сумішей та описано можливі шляхи вдосконалення технологій сепарації газу.*

8. Настенко О.В. Physical conditions and mechanisms for separation condensate systems / Ляпощенко О.О., Логвин А.В., Аль Раммахи М.М., Настенко О.В. // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus – 2013. Special number — С.81-83. *Особистий внесок: проведено аналіз для видачі рекомендацій щодо використання отриманих результатів досліджень.*

9. Настенко О.В. Интегрированные технологии автоматизированного проектирования с динамическим моделированием работы сепарационного и теплообменного оборудования в составе промышленных установок и комплексов / Ляпощенко О.О., Настенко О.В. // Прогрессивные технологии и процессы: Сборник научных статей Международной молодежной научно-практической конференции. — Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. — Т.1. — С.353-357. *Особистий внесок: проаналізовано основні технології автоматизованого*



*проектування та видано рекомендації щодо їх ефективного використання при проектуванні сепараційного обладнання.*

10. Настенко О.В. Mathematical modeling of separation process by coupled heat transfer in the inertial-filtering gas separator-condenser / Настенко О.В., Ляпощенко О.О., Броняж-Пресс Л. // *Inżynieria i aparatura chemiczna* 55, Vol.2, 2016 - Р. 62-63. *Особистий внесок: розроблено математичну модель, що описує процеси супутнього теплообміну при інерційно-фільтруючій сепарації.*

11. Пат. на корисну модель №82976 У Україна, Пристрій для вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку / Склабінський В.І., Ляпощенко О.О., Логвин А.В., Настенко О.В., Пономаренко Д.В. // МПК В01D 45/00 В01D 45/04 (2006.01) — №201301444; Заявлено 07.02.2013; Надрук. 27.08.2013, Бюл. №16, 2013. *Особистий внесок: аналіз ідеї корисної моделі, підготовка матеріалів до подачі заявки.*

12. Пат. на корисну модель №85952 У Україна, Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку / Склабінський В.І., Ляпощенко О.О., Настенко О.В., Сердюк О.А. // МПК В01D 45/04 (2006.01) — №201306402; Заявлено 23.05.2013; Надрук. 10.12.2013, Бюл. №23, 2013. *Особистий внесок: аналіз ідеї корисної моделі, підготовка матеріалів до подачі заявки.*

13. Пат. на корисну модель №88516 У Україна, Спосіб сепарації конденсацією / Склабінський В.І., Ляпощенко О.О., Настенко О.В., Сердюк О.А. // МПК В01D 45/04 (2006.01) — №201309181; Заявлено 22.07.2013; Надрук. 25.03.2014, Бюл. №6, 2014. *Особистий внесок: аналіз ідеї корисної моделі, підготовка матеріалів до подачі заявки.*

14. Пат. на корисну модель №102445 У Україна, Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку / Ляпощенко О.О., Павленко І.В., Настенко О.В., Усик Р.Ю., Дем'яненко М.М. // МПК В01D 45/04 (2006.01) - №201505124; Заявлено 25.05.2015; Надрук. 26.10.2015, Бюл. №20, 2015. *Особистий внесок: аналіз ідеї корисної моделі, підготовка матеріалів до подачі заявки.*

15. Настенко О.В. Інерційно-фільтруючі сепаратори для очистки промислових газів і розділення газоконденсатних сумішей хімічних і газопереробних виробництв / Ляпощенко О.О., Логвин А.В., Настенко О.В. // Збірник тез доповідей I Міжнародної науково-технічної конференції «Хімічна технологія: наука і виробництво», м. Шостка, 2012, с. 100. *Особистий внесок: проведено аналіз актуальності використання інерційно-фільтруючих сепараторів.*

16. Настенко О.В. Фізичні умови утворення та сепарації газоконденсатних систем / Ляпощенко О.О., Настенко О.В. // Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. — 2013. — Ч.2. — С.136. *Особистий внесок: проаналізовано основні механізми утворення та сепарації газодисперсних систем.*

17. Настенко О.В. Физическая модель формирования высокодисперсных систем в турбулентном потоке газа / Ляпощенко О.О., Настенко О.В., Логвин А.В., Аль Раммахи М.М., Настенко О.В. // Современные направления теоретических и прикладных исследований '2013. Режим доступа: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-113/chemical-113/17267-113-0988> *Особистий внесок: проведено аналіз умов та механізмів утворення краплинної рідини в потоці газу.*

18. Настенко О.В. Analysis of the Phase Equilibrium Conditions and the Impact of Coupled Heat and Mass Transfer on the Separation Process Efficiency in the Inertial – Filtering Gas Separator / Ляпощенко О.О., Настенко О.В. // Хімія та хімічні технології: Матеріали III Міжнародної конференції молодих вчених ССТ-2013. — С.138-141. *Особистий внесок: на основі проведеного аналізу основних умов сепарації газорідинних сумішей видано рекомендації щодо вдосконалення технологій їх сепарації.*

19. Настенко О.В. Моделирование процессов сепарации та прогнозування ефективності блокового горизонтального газосепаратора УКПГ для газових та газоконденсатних родовищ / Ляпощенко О.О., Настенко О.В., Сердюк О.А., Усик Р.Ю // Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма III Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, 2014.-Ч.2.-С.96. *Особистий внесок: проведення досліджень ефективності роботи блочних сепараційних пристроїв.*

20. Настенко О.В. Аналіз фазової рівноваги та моделювання сполученого теплообміну в процесі інерційно-фільтрувальної сепарації конденсацією / Ляпощенко О.О., Настенко О.В. // Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма III Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, 2014.-Ч.2.-С.98. *Особистий внесок: проведення аналізу та моделювання сполученого теплообміну в процесі інерційно-фільтруючої сепарації.*

21. Настенко О.В. Моделирование и проектирование инерционно-фильтрующих газосепараторов-конденсаторов для компрессорных установок нефтегазовой промышленности / Склабинский В.И., Ляпощенко О.О., Аль-Раммахи М.М., Настенко О.В. // Сборник докладов участников XIV Международной научно-технической конференции «Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования» - «ГЕРВИКОН-НАСОСЫ-2014». – С.97-104. *Особистий внесок: проведення аналізу отриманих результатів математичного моделювання гідродинаміки руху потоків в інерційно-фільтруючих сепараторах.*

22. Настенко О.В. Проектування установок низькотемпературної переробки вуглеводнів з використанням програмних пакетів технологічних розрахунків / Ляпощенко О.О., Настенко О.В. // XXI Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD-2014), 2014 – с. 289 . *Особистий внесок: проведено аналіз можливостей програмних пакетів технологічних розрахунків для проектування сепараційного обладнання.*

23. Настенко О.В. Метод дисперсного аналізу неоднорідної системи з рідини та зважених частинок неправильної форми / Черниш Ю. М., Смирнов В. А., Настенко О. В., Ляпощенко О. О., Руденко П. В. // Матеріали науково - технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів Факультету технічних систем та енергоефективних технологій - 2015, Ч.2, с. 119. *Особистий внесок: проведено дисперсний аналіз системи з рідини та зважених частинок неправильної форми.*

24. Настенко О.В. Mathematical modeling of separation process by coupled heat transfer in the inertial-filtering gas separator-condenser / Настенко О.В., Ляпощенко О.О., Броняж-Пресс Л. // Materiały konferencyjne: XI Ogólnopolska konferencja przepływów wielofazowych, Polska, 2015. – S.29-30. *Особистий внесок: проведення адаптації моделей теплообміну до умов інерційно-фільтруючої сепарації конденсацією.*

25. Настенко О.В. Oczyszczanie strumienia powietrza w cylindrycznym odpylaczu komorowym / Марек Оховяк, Любомира Броняж-Пресс, Ольга Настенко // Materiały konferencyjne: XI Ogólnopolska konferencja przepływów wielofazowych, Polska, 2015. – S.31-32. *Особистий внесок: проведено серію експериментальних досліджень*

26. Настенко О.В. Моделирование процессов сепарации и классификации газодисперсных систем в вибрирующих инерционно-гравитационных сепараторах / Люшниченко М. П., Настенко О. В., Павленко И. В., Ляпощенко А. А. // Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма IV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, 2016.-Ч.2.-С.83. *Особистий внесок: аналіз отриманих результатів математичного моделювання.*

27. Настенко О.В. Гидродинамические закономерности разделения стойких водонефтяных эмульсий в сепараторах-деэмульсаторах / Старинский А. Е., Демьяненко М. М., Настенко О. В., Павленко И. В., Ляпощенко А. А. // Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма IV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, 2016.-Ч.2.-С.86. *Особистий внесок: видача рекомендацій щодо застосування результатів досліджень.*

28. Настенко О.В. Узагальнення результатів досліджень процесів інерційно-фільтрувальної сепарації / Настенко О. В. // Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма IV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, 2016.-Ч.2.-С.111-112. *Особистий внесок: проведення узагальнення отриманих результатів досліджень.*

29. Настенко О.В. Применение многофункционального блочного нефтегазоводоразделителя типа "heater-treater" для промысловой подготовки нефти и газа / Ляпощенко А.А., Маренок В.М., Настенко О.В., Острога Р.О., Смирнов В.А., Усик Р.Ю. // Технологии XXI века: Сборник тезисов по материалам 21й международной научной конференции. Ч.1, 2015.- с.109-110. *Особистий внесок: розробка рекомендацій щодо використання отриманих результатів досліджень.*

30. Настенко О.В. Оптимізаційне проектування багатофункціонального сепараційного нафтогазового обладнання / О.О.Ляпощенко, І.В.Павленко, О.В.Настенко, М.М.Дем'яненко, О.Є.Старинський // Матеріали і всеукраїнської науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем», І частина, 2015. – с.226-231. *Особистий внесок: розробка рекомендацій щодо використання отриманих результатів досліджень.*

## АНОТАЦІЯ

**Настенко О.В. Моделювання процесів інерційно-фільтруючої сепарації газорідинних сумішей. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Сумський державний університет МОН України, Суми, 2016.

Метою цієї роботи є моделювання процесів інерційно-фільтруючої сепарації газорідинних сумішей, удосконалення існуючих методів розрахунку гідродинамічних характеристик та геометричних показників інерційно-фільтруючих сепараторів, видача рекомендацій з інженерного проектування інерційно-фільтруючих сепараторів-конденсаторів для очищення газорідинних сумішей.

Дисертаційна робота присвячена моделюванню процесів, що відбуваються під час інерційно- фільтруючої сепарації газорідинних сумішей, а також ефективності розділення таких систем. Проведено математичне моделювання гідродинаміки руху газового та рідинного потоків криволінійними каналами сепаратора, а також взаємодії цих потоків в процесі сепарації. Також встановлено основні залежності, що описують супутній теплообмін при інерційно-фільтруючій сепарації з конденсацією.

Проведені математичні розрахунки підтверджуються результатами експериментальних досліджень, тобто розроблена математична модель може бути адекватно застосована для розрахунку процесів інерційно-фільтруючої сепарації. Основні наукові результати дисертаційної роботи впроваджено в виробництво.

Ключові слова: *сепарація, фільтрація, гідродинаміка, супутній теплообмін, газорідинна суміш, моделювання, дисперсні частки.*

## АННОТАЦИЯ

**Настенко О.В. Моделирование процессов инерционно-фильтрующей сепарации газожидкостных смесей. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Сумский государственный университет МОН Украины, Сумы, 2016.

Целью данной работы является моделирование процессов инерционно-фильтрующей сепарации газожидкостных смесей, совершенствование

существующих методов расчета гидродинамических характеристик и геометрических показателей инерционно-фильтрующих сепараторов, выдача рекомендаций к инженерному проектированию инерционно-фильтрующих сепараторов-конденсаторов для очистки газожидкостных смесей.

Несмотря на технический прогресс, химическая и смежные отрасли промышленности достаточно инертно реагируют на изменения и остаются неконкурентоспособными. Предприятия этих отраслей являются производствами со сложными технологическими линиями и комплексами, в обслуживании которых используются теплообменные, механические или химические процессы, сопровождающиеся образованием и разделением газожидкостных смесей. Поэтому одним из наиболее распространенных процессов химической технологии является сепарация газодисперсных смесей. Но технологии и техника очистки загрязненных газовых выбросов до сих пор имеют низкие показатели эффективности, которые обеспечивают лишь грубую очистку газов. Поэтому одной из существующих и актуальных проблем химической промышленности Украины является совершенствование и оптимизация процессов сепарации газодисперсных смесей.

Диссертационная работа посвящена моделированию процессов, происходящих во время инерционно-фильтрующей сепарации газожидкостных смесей, а также оценке их влияния на эффективность разделения таких систем. Проведено математическое моделирование гидродинамики движения газового и жидкостного потоков криволинейными каналами сепаратора, а также взаимодействия этих потоков в процессе сепарации. Также установлены основные зависимости, описывающие сопутствующий теплообмен при инерционно-фильтрующей сепарации с конденсацией. Теоретическим анализом математической модели движения газокapelьного потока по криволинейному каналу усовершенствовано аналитическое решение системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса и численное решение стационарной задачи моделирования движения капelь жидкости относительно составляющих локальных скоростей движения сплошной фазы и дисперсных частиц с определением потенциальных зон инерционно-фильтрующей сепарации и зон вторичного брызгоуноса.

Проведенные математические расчеты подтверждаются результатами экспериментальных исследований, то есть разработанная математическая модель может быть применена для расчета процессов инерционно-фильтрующей сепарации. Выданы рекомендации к инженерному проектированию инерционно-фильтрующих сепараторов при помощи систем моделирования методами вычислительной гидродинамики.

Основные научные результаты диссертационной работы внедрены в производство.

Ключевые слова: *сепарация, фильтрация, гидродинамика, сопряженный теплообмен, газожидкостная смесь, моделирование, дисперсные частицы.*

## ABSTRACT

### **Nastenko O.V. Modeling of the Inertial-Filtering Separation Processes of Gas-Liquid Mixtures. – Manuscript.**

Ph. D. thesis in Technical Science in speciality 05.17.08. “Processes and Equipment of Chemical Technology”- Sumy State University, Ministry of Education and Science of Ukraine, 2016.

Goal of the research is modeling of the inertial-filtering separation processes of gas-liquid mixtures, improving of the existing calculation methods of the inertial-filtering separator hydrodynamic characteristics and geometrical parameter, working out recommendations in engineering design of the inertial-filtering separators-condensers for gas-liquid mixtures depuration.

Dissertation is devoted to the modeling of the processes taking place during inertial-filtering separation of gas-liquid mixtures and their influence on the efficiency of such systems separation. One conducted mathematical modeling of gas and liquid flow hydrodynamics in the curvilinear separator channels and interaction of these flows in the separation process. Also there are determined the dependences which describe joint heat exchange which takes place during inertial-filtering separation with condensation.

The conducted mathematical calculations are proved with the experimental research results, meaning the developed mathematical model can be used for calculating processes of the inertial-filtering separation. The main scientific results of the dissertation are implemented into production process.

**Key words:** *separation, filtration, hydrodynamics, joint heat exchange, gas-liquid mixture, modeling, dispersed particles.*

Підписано до друку 23.09.2016 р.  
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. №.768

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007 р.